

TEMA 49

MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE ALTERNA: CONSTITUCIÓN, FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES CARACTERÍSTICAS.

1. INTRODUCCIÓN.

2. CLASIFICACIÓN GENERAL Y CONCEPTOS PREVIOS.

- 2.1 Clasificación de las máquinas eléctricas rotativas de CA.
- 2.2 Fenómeno de la autoinducción.
- 2.3 Imanación y circuito magnético.
- 2.4 Ciclo de histéresis.
- 2.5 Corriente de Foucault.
- 2.6 Devanados de inducido.

3. TRANSFORMADORES.

- 3.1 Constitución y principio de funcionamiento. Transformador monofásico.
- 3.2 Transformadores trifásicos.
- 3.3 Clasificación general de los transformadores.
- 3.4 Aplicaciones.

4. MÁQUINAS SINCRONAS.

- 4.1 Generalidades.
- 4.2 Máquinas sincronas como generador de corriente alterna (alternador)
 - 4.2.1 Funcionamiento en paralelo.
 - 4.2.2 Maniobra de acoplamiento.
- 4.3 Motores eléctricos rotativos síncronos.
 - 4.3.1 Constitución y principio de funcionamiento.
 - 4.3.2 Aplicaciones del motor sincrónico.
 - 4.3.3 Arranque y características de servicio.
- 4.4 Motores de reluctancia y de histéresis.
- 4.5 Máquinas sincronas con colector. El motor universal.

5. MÁQUINAS ASÍNCRONAS COMO MOTOR DE INDUCCIÓN.

- 5.1 Constitución y principio de funcionamiento. Campo magnético giratorio.
- 5.2 Motor trifásico de inducción.
- 5.3 Conexión para el arranque del motor trifásico de inducción.
- 5.4 Motor monofásico de inducción.
- 5.5 Motor de espira en cortocircuito.
- 5.6 Motores de fase partida.

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCIÓN.

Las máquinas de corriente alterna comienzan a utilizarse a comienzos del siglo XX, hoy en día son, por excelencia, los generadores de electricidad y los productores de fuerza motriz. Se utilizan para efectuar transformaciones electromagnéticas. En los generadores, gracias a las leyes de la inducción se transforma la energía mecánica en energía eléctrica, originándose una tensión.

Estas mismas leyes permiten en los motores eléctricos la energía eléctrica se transforme en mecánica, dando como resultado un movimiento de rotación.

2. CLASIFICACIÓN GENERAL Y CONCEPTOS PREVIOS.

2.1 Clasificación de las máquinas eléctricas rotativas de CA.

a) Máquinas eléctricas rotativas de CA.

- Motores de CA.

Monofásicos: Inducción.

Rotor de jaula de ardilla.

Rotor devanado.

Síncronos.

Imán permanente.

Reluctancia.

Histéresis.

Universales: Monofásicos

Trifásicos.

Polifásicos: Inducción.

Rotor en cortocircuito.

Rotor devanado.

Rotor mixto.

Síncronos:

- Generadores de CA.

Síncronos o alternadores: Monofásicos

Polifásicos.

Asíncronos.

b) Máquinas eléctricas estáticas:

- Transformadores: Monofásicos

Trifásicos.

Polifásicos.

2.2 Fenómeno de la autoinducción.

Se ha demostrado que en un circuito fijo se induce una fem. siempre que aumente o disminuya el flujo magnético ligado al mismo.

El origen del campo magnético es independiente del circuito en el cual se produce la fem. inducida. Pero cuando circula una corriente por el circuito, esta corriente crea un campo magnético ligado al circuito variable se induce una fem a causa de la variación de su propio campo, esta fem se denomina *fuerza electromotriz autoinducida*

La autoinducción de un circuito depende de su tamaño, forma, número de espiras, etc.

Depende también de las propiedades magnéticas de las sustancias en las cuales existe campo magnético.

La autoinducción de un circuito puede considerarse, por tanto, como la fem autoinducida por unidad de variación de la intensidad de corriente., por consiguiente la autoinducción de un circuito es un henrio si se induce en él una fem de un voltio cuando la corriente varía a razón de un amperio por segundo.

2.3 Imanación y circuito magnético.

El fenómeno de los dominios magnéticos es el que explica el fenómeno de la imanación. La orientación del espacio de las órbitas electrónicas, su inclinación respecto a un plano y el sentido de giro del electrón sobre sí mismo produce un campo magnético.

La imanación se produce en aquellos materiales cuya configuración permite que se den una serie de condiciones tales como:

- Que exista al menos un spin sin compensar (+ o -) en una órbita interior.
- Que exista una relación entre el diámetro del átomo y el de las capas en las que se encuentran los electrones cuyos spines no han sido compensados, de forma que los spines resultantes entre átomos próximos sean paralelos.
- Que las fuerzas de intercambio entre átomos sean muy intensas y sólo se den en zonas muy pequeñas, denominadas dominios.

Un átomo que cumple todas estas condiciones es el hierro, cuya configuración es un cubo con un átomo en cada vértice y otro en el centro.

En un circuito magnético existen dos variables de gran importancia para su cálculo y diseño.

- La fuerza magnetomotriz (fmm), expresada en amperios vueltas, que es la causa imanadora que produce el flujo a través del circuito.
- La reluctancia magnética (Rm), que es la mayor o menor oposición que ofrece el circuito magnético al establecimiento del flujo.

2.4 Ciclo de histéresis.

El ciclo o curva de histéresis sirve para el estudio y medida de las propiedades y magnitudes magnéticas mediante el anillo de Rowland.

Es un anillo desimantado al cual se le realiza un arrollamiento magnetizante o de excitación y se dispone de un galvanómetro balístico o medidor de flujo, que nos permitirá realizar mediciones sobre la intensidad de excitación, se inicia un proceso de imanación aumentando progresivamente la corriente de excitación hasta llegar al punto "a" de la curva..

Al disminuir la intensidad de excitación obtendremos la curva "ab" distinta a la inicial, si invertimos el sentido de la intensidad de excitación alcanzaremos un valor máximo negativo "d".

Al incrementar la excitación la curva sigue una trayectoria que completa el ciclo pasando por los puntos "e", "f" y "a".

Figura 4

2.5 Corriente de Foucault.

En muchas piezas de aparatos eléctricos hay masas metálicas móviles en un campo magnético uniforme o situadas en un campo magnético variable, dando ello por resultado la producción de corrientes inducidas que circulan en el interior del metal. A causa de su naturaleza general circulatoria se denominan corrientes en torbellinos o corrientes parásitas de Foucault.

Estas corrientes generan pérdidas que se manifiestan con el calentamiento del núcleo magnético. Como ejemplo de corrientes de Foucault, consideraremos el núcleo de un transformador de corriente alterna.

2.6 Devanados de inducido.

Los conductores de los arrollamientos de las bobinas del inducido van alojados en ranuras periféricas de los paquetes magnéticos del estator o rotor y están unidos por conexiones frontales,. A este tipo de devanados se les denomina de tambor y son los instalados en la mayoría de los motores.

Las formas más generalizadas de conexión de las bobinas del devanado son la conexión imbricada y la conexión ondulada.

- Conexión imbricada: El primer conductor final de retorno de una bobina se conecta con el primer conductor de ida de la siguiente bobina dispuesta junto a muy próximo a la primera.
- Conexión ondulada: la conexión de una bobina con la siguiente se realiza siguiendo el mismo sentido de avance de la bobina y para que las fem inducidas en cada bobina deben estar en fase.

3. TRANSFORMADORES.

3.1 Constitución y principio de funcionamiento. Transformador monofásico.

El transformador se compone de dos arrollamientos aislados eléctricamente entre sí y devanados sobre el mismo núcleo de hierro, y se definen como máquinas estáticas que tienen la misión de transmitir, mediante un campo electromagnético alterno, la energía eléctrica de un sistema, con una determinada tensión, a otro sistema con tensión deseada.

Expresado en términos más sencillos, podemos decir que una corriente alterna que circula por uno de los arrollamientos crea en el núcleo un campo magnético alterno. La mayor parte de este flujo atraviesa el otro arrollamiento e induce en él una fem. alterna. La potencia es transmitida de un arrollamiento a otro por medio del flujo del núcleo.

El devanado que se conecta a la red de alimentación, denominado generalmente devanado primario da lugar a un campo magnético en el núcleo que varía periódicamente, de acuerdo con la frecuencia de la corriente, induciendo una tensión en las espiras del segundo devanado, llamado devanado secundario, que, de acuerdo con las leyes de la autoinducción, está desfasada respecto de la tensión 180° .

- Transformación en vacío.

En vacío, o sea cuando no hay carga en el secundario, los transformadores consumen sólo la corriente de excitación del primario. La potencia consumida en vacío se compone casi exclusivamente de las pérdidas en el hierro. Se conoce como intensidad de cortocircuito la que circula por el primario estando el secundario en cortocircuito.

- Características constructivas.

El núcleo se compone de chapas de hierro magnético, con un porcentaje determinado de silicio, la aleación de silicio confiere al hierro una elevada permeabilidad, perdiendo rápidamente el magnetismo remanente al cesar el campo.

Según su núcleo se distinguen dos tipos: de columnas y acorazado.

Las bobinas pueden ser cilíndricas o bien planas o discoidales, la bobina con mayor número de espiras se llama de alta tensión y la de menos, de baja tensión. Normalmente están colocadas en la misma columna, aunque excepcionalmente pueden estarlo en columnas distintas.

En los transformadores pequeños se hallan en contacto con el aire, el calor que desprenden se elimina por convección.

La conexión de los transformadores de potencia se hace mediante interruptores de potencia.

3.2 Transformadores trifásicos.

Los transformadores trifásicos se comportan como un sistema de tres transformadores monofásico, de forma que las bobinas están colocadas en un núcleo especial común. Constan por tanto de tres primarios y tres secundarios, que se conectan en estrella o triángulo, se considera cada fase como un circuito independiente, desfasados entre sí 120° .

Las diversas maneras de agrupar las conexiones de los transformadores están establecidas por las normas DIN y CEI en 4 grupos de conexión y 3 subgrupos por cada uno de ellos.

3.3 Clasificación general de los transformadores.

Atendiendo a las características constructivas pueden ser de columna o acorazados, según *el sistema de tensiones pueden ser:*

- Monofásico.
- Bifásicos.
- Trifásicos.
- Polifásicos.

Por su función:

- De potencia.
- De tensión.
- De intensidad.
- De aislamiento.
- etc.

Según el elemento refrigerante:

- En seco.
- En baño de aceite.
- Con pyraleno.

Según el medio ambiente para el que estén preparados.

- De intemperie.
- Para interior.

3.4 Aplicaciones de los transformadores.

A) Autotransformador.

Se diferencia de los transformadores ordinarios, en que no tiene separados el primario y secundario. La ventaja es tanto mayor cuanto más se aproxima a 1 la relación de transformación.

b) Transformador regulador.

Para variar intensidades de iluminación (juegos de luces) en teatros, cines y salas de fiestas, así como para el arranque de motores monofásico o trifásicos, se utilizan los transformadores reguladores.

c) Transformadores de protección o aislamiento.

Sirven para la protección contra tensiones perturbadoras o peligrosas procedentes de la red de alimentación. La tensión secundaria suele ser igual o inferior a la de alimentación.

d) Transformadores de potencia.

Suelen ser monofásico o trifásicos, los trifásicos son los más utilizados tanto como elevadores como reductores de tensión.

e) Transformadores de medida.

En las instalaciones de A.T. los aparatos de medida, por razones técnicas y de seguridad no se pueden conectar directamente, sino que ello se efectúa a través de los transformadores de medida. Cabe distinguir dos tipos: transformadores de tensión y transformadores de intensidad.

4. MÁQUINAS SINCRONAS.

4.1 Generalidades.

Las máquinas sincrónicas son los convertidores rotativos que, girando a una velocidad constante proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico, transforman la energía mecánica en energía eléctrica, bajo la forma de corrientes alternas o viceversa, la energía eléctrica de corrientes alternas en energía mecánica.

4.2 Máquinas sincrónicas como generador de corriente alterna (alternador).

Se denomina alternador a la máquina síncrona capaz de producir una fem sinusoidal. Es el generador universal de CA, y su utilización está generalizada en todo tipo de centrales productoras de electricidad. Forma parte del grupo de máquinas sincrónicas de CA y puede funcionar de forma reversible, como alternador o como motor síncrono.

A) Generador síncrono monofásico.

La máquina síncrona elemental monofásica de inducción móvil, excita el devanado del rotor con corriente continua y posee una corona magnética con dos ranuras longitudinales diametralmente opuestas en su interior, en las que se aloja una bobina simple de N espiras.

B) Generador síncrono trifásico.

Si en lugar de una sola bobina estática, se dispone de tres bobinas simples idénticas de paso diametral y cuyos ejes estén desplazados $2\pi/3$ radianes los flujos conectados por estas bobinas constituirán un sistema trifásico equilibrado.

4.2.1 Funcionamiento en paralelo.

Las máquinas sincrónicas de igual número de fases pueden asociarse, teóricamente, en serie y en paralelo al igual que se hace con los acumuladores y las máquinas de corriente continua.

El acoplamiento en serie, caracterizado por la igualdad de corriente y una tensión total igual a la suma de las tensiones individuales, apenas es utilizado en la práctica. En cambio, el acoplamiento en paralelo, caracterizado por una tensión en bornes común y una corriente instantánea total igual a la suma de las corrientes instantáneas de cada una de las máquinas, es práctica universal en todas las centrales de producción de energía eléctrica.

Las ventajas son las siguientes, por una parte, la variabilidad de la demanda en el tiempo y el espacio aconseja repartir la producción en varias centrales para que estas no resulten de potencia desproporcionada y puedan funcionar siempre en condiciones de óptimo rendimiento, y por, otra, la seguridad y continuidad de suministro queda aumentadas considerablemente.

4.2.2 Maniobra de acoplamiento.

El acoplamiento en paralelo de un alternador con otro ya en servicio, o sobre un sistema de barras conectadas a una red alimentada por los alternadores de otras muchas centrales, requiere que previamente se cumplan ciertas condiciones para que la maniobra tenga lugar sin perturbaciones peligrosas. Estas condiciones son:

- Los sistemas polifásicos de tensiones del alternador y de la red a la que va a acoplarse, deben tener el mismo número de fases, la misma secuencia y la misma tensión eficaz.

- Las frecuencias deben de ser iguales, lo que implica que la velocidad del alternador a acoplar debe corresponder con la frecuencia del sistema sobre el que se va a conectar.

- Las tensiones homólogas del alternador y De la red deben estar en fase en el instante de la conexión, lo que significará que la diferencia de tensiones entre los bornes homólogo del interruptor de conexión debe ser nula en el instante del cierre de contactos.

4.3 Motores eléctricos rotativos síncrono.

4.3.1 Constitución y principio de funcionamiento.

Al conectar el devanado trifásico del estator a una red exterior de alimentación exterior, las corrientes trifásicas que circularán por las bobinas del estator, darán origen a una onda de fmm giratoria, de velocidad angular, en radianes eléctricos por segundo, determinante a su vez de un campo giratorio de igual velocidad.

a) Constitución.

Tal y como podemos observar en la figura, los motores síncrono tienen una constitución idéntica a los alternadores trifásicos de polos interiores. Por lo tanto, ofrecen la posibilidad de trabajar como motor o como generador. El estator consta de un paquete de chapas ranuradas, donde se aloja el devanado inducido trifásico. El rotor está formado por una rueda de polos, alimentados por corriente continua, que son los que inducen el campo de excitación.

Figura14

4.3.2 Aplicaciones del motor síncrono.

Las cualidades funcionales del motor síncrono de las que se pueden deducir sus aplicaciones son:

- Velocidad constante.
- No precisa de energía magnetizante, y si es preciso puede incluso generarla.
- Par motor proporcional a la tensión.
- Entrehierro relativamente importante, o que aumenta la seguridad mecánica.

Estas particularidades del motor síncrono pueden hacerlo preferible al síncrono en el accionamiento de compresores, ventiladores, bombas de mediana y gran potencia y en particular en convertidores de frecuencia, en los que interesa una velocidad constante.

4.3.3 Arranque y características de servicio.

Las máquinas sincrónicas en su funcionamiento presentan el grave inconveniente, aunque su devanado inductor esté excitado, de que, en reposo, e incluso a cualquier otra velocidad que no sea la de sincronismo, el par motor medio que desarrolla al conectarla a la red es nulo.

Para que el motor síncrono funcione como precisa, a la velocidad de sincronismo, se utilizan varios procedimientos de arranque:

1. Arranque por motor auxiliar, de corriente continua o de corriente alterna, seguido del acoplamiento en paralelo de la máquina síncrona con la red.
2. Arranque con motor asíncrono, sobre la misma red alterna de alimentación y sincronización al excitar el circuito inductor.

4.4 Motores de reluctancia y de histéresis.

En el campo de las potencias fraccionales inferiores a un caballo, se construyen distintos tipos de motores síncrono, algunos con inductores de imanes permanentes, de dos, cuatro y excepcionalmente seis polos, cuyas aplicaciones son muy diversas.

a) Motores de reluctancia:

También llamado autosíncrono, es un motor de inducción que tienen la singularidad de que su rotor de jaula de ardilla presenta un corte de chapa con amplias muescas, en número igual al de los polos del devanado polifásico o monofásico del estator, muescas en las que, por lo general, siguen presentes las barras de la jaula de ardilla.

b) Motor de histéresis.

Tiene como el anterior, el estator normal de los motores síncrono o asíncrono con un devanado polifásico o monofásico con fase de arranque, y un rotor constituido por un simple cilindro, sin salientes polares ni dientes, de acero ferromagnético de acusado ciclo de histéresis.

4.5 Máquinas sincrónicas con colector. El motor universal.

El motor serie de corriente alterna monofásico con colector está compuesto de un estator, formado por chapas magnéticas al silicio, aisladas entre sí, para reducir las pérdidas por Foucault, de 0,5 mm de espesor, sobre el cual se haya dispuesto un devanado inductor.

En los motores de potencias medias y elevadas, el circuito magnético del estator es similar al de los motores de inducción y máquinas sincrónicas, es decir, presenta la forma de toro de sección rectangular ranurado interiormente.

Los motores de pequeña potencia, por lo general inferior al Kw, el estator es de polos salientes. El devanado inductor está formado, en este caso, por bobinas simples dispuestas alrededor de los polos y el de compensación por algunas espiras entre polos.

5. MÁQUINAS ASÍNCRONAS COMO MOTOR DE INDUCCIÓN.

5.1 Constitución y principio de funcionamiento. Campo magnético giratorio.

a) Generalidades.

Las máquinas asíncronas se caracterizan por el hecho de que existe un deslizamiento entre la velocidad de sincronismo del campo magnético giratorio y la velocidad de giro del rotor de la máquina.

b) El motor de inducción en reposo.

Al someter los tres devanados de fase del estator a la tensión de un sistema trifásico se crea un campo magnético giratorio en el estator de velocidad igual a la de sincronismo e idéntico a la de las corrientes que atraviesan el estator.

b) El campo magnético giratorio.

La característica más útil de la corriente trifásica es la de crear un campo magnético giratorio, es decir, un campo producido por los devanados del estator, espaciado entre sí 120°, cuyos polos van girando, aunque las bobinas del estator estén fijas. Provocan en el rotor otro campo magnético de polaridad contraria, por lo que son atraídos por el estator, girando con ellos, en consecuencia el motor gira siguiendo al campo giratorio.

Figura 25

5.2 Motor trifásico de inducción.

A) Constitución

El estator es análogo al de un motor síncrono, o sea, contrituido por chapas ranuradas en las que se aloja el devanado trifásico. El rotor es similar al estator, es decir, formado también por chapas ranuradas donde se aloja un devanado.

Figura 26

B) Funcionamiento.

1. Arranque.

Al conectarse el devanado trifásico a la red, se origina un campo magnético giratorio que se desplaza a la velocidad de sincronismo, igual que en un motor síncrono. Este campo atraviesa el devanado del rotor induciendo tensiones alternas de frecuencia igual a la red.

Los motores Asíncronos el campo giratorio del estator cumple dos funciones:

- Originar una tensión inducida en el rotor, que creará a su vez un campo giratorio en el mismo.

- Crear por efecto conjunto con el campo giratorio del rotor un momento de giro que origina el movimiento del rotor y de la carga acoplada al mismo.

2. *Marcha en vacío.*

El deslizamiento, debido al pequeño freno originado por las pérdidas mecánicas, es de sólo algunas vueltas. Tensión, frecuencia, intensidad de corriente y el campo del rotor tienen valores muy pequeños. A pesar de ello, y debido a la magnetización total, la corriente absorbida es notable, del orden del 30% para motores grandes y del 60% para pequeños.

3. *Marcha en carga.*

Debido al freno de carga disminuye la velocidad del rotor, aumentando el deslizamiento que para carga nominal vale del 3 al 5%.

Debido al aumento del deslizamiento, crecen en el rotor los valores de la tensión y de la intensidad de corriente, consiguiéndose un intenso campo que proporciona el momento adecuado para el arrastre de la carga. El número de rev/min. disminuye muy poco, incluso para cargas elevadas, ya que el incremento del deslizamiento provoca un aumento del motor de giro.

5.3 Conexión para el arranque del motor trifásico de inducción.

a) *Conexión directa-guardamotor.*

Para el arranque directo de un motor trifásico de rotor en cortocircuito, se conectan los devanados del motor en cualquiera de las dos formas clásicas, estrella o triángulo. Esto es función de la tensión nominal y características de la línea.

b) *Conexión estrella-triángulo.*

Con este sistema de arranque estrella-triángulo mediante contactores se pretende un arranque con una primera conexión en estrella, con la finalidad de rentabilizar mejor la intensidad de arranque. Para que, después de pasados unos segundos en los que el motor adquiriera su velocidad nominal, se cambien a la conexión en triángulo. La elección de fusibles y relé térmico sigue los mismos criterios indicados para el circuito guardamotor.

c) *Inversión de giro.*

Para realizar el cambio de sentido de giro del motor es necesario un circuito que cambie de dos fases.

5.4 Motor monofásico de inducción.

En los motores más utilizados en aquellas instalaciones industriales que no disponen de red trifásica o para las aplicaciones domésticas. La forma y constitución del rotor les da también la denominación de motor de jaula de ardilla o de rotor en cortocircuito. En el estator se montan dos devanados desfasados geométricamente 90°, con la finalidad de provocar un desfase en las corrientes estatóricas y que los campos del rotor y del estator no se anulen y poder disponer un par de arranque.

Para conseguir un par de arranque existen dos variantes de los motores de inducción: motores con espira de sombra y motores de fase partida.

a) *Motores con espira de sombra o en cortocircuito.*

Mediante la espira en cortocircuito se obtienen dos pares de polos, y por tanto dos campos magnéticos desfasados, con ello se consigue que el campo magnético rotórico no se anule con el campo del rotor y exista un par de arranque.

Figura 32

b) *Motores de fase partida.*

Este motor devanados, uno principal y otro auxiliar. Según la forma de conexión de estos dos devanados existen dos tipos:

- Motor de fase partida con condensador.
- Motor de fase partida sin condensador.

El primero de ellos se alimenta de los devanados en paralelo, intercalando un condensador en serie con el devanado auxiliar.

Figura 33

BIBLIOGRAFIA

Cortés Manuel: Curso de máquinas eléctricas. Tomo 1. La máquina eléctrica en general.
Editores técnicos asociados SA Barcelona 1977.